

University of Groningen

## In-depth gamma-ray studies. Borehole measurements.

Hendriks, Peter

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2003

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Hendriks, P. (2003). In-depth gamma-ray studies. Borehole measurements. Groningen: s.n.

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

**Take-down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

## SAMENVATTING

Vaak staan we niet stil bij de bodem waarop we lopen. Toch heeft deze bodem, gevormd onder de invloed van weer en wind, meestal een lange geschiedenis. De opbouw van de ondergrond kan ons iets vertellen over dit vormingsproces. Daarnaast is de bodem een bron van grondstoffen, zoals olie, gas, drinkwater en zware mineralen voor industriële toepassingen. Zowel vanuit de Aardwetenschappen als de industrie wordt daarom gezocht naar methodes om *kwantitatief* de ondergrond te karakteriseren. Metingen aan de ondergrond zijn moeilijk, bijvoorbeeld omdat bodemonsters bijna niet onverstoord naar boven gebracht kunnen worden. Daarom is de standaardtechniek om *in situ* te meten. Men laat een meetsonde in een boorgat zakken en de bodem wordt op die manier als het ware "gescand".

Een veel gebruikte methode om zo de bodem in kaart te brengen is door meting van de natuurlijke  $\gamma$ -straling uitgezonden door de formatie zelf. De aardkorst bevat namelijk kleine hoeveelheden natuurlijke radioactiviteit. Afhankelijk van de mineraaleigenschappen worden de radioactieve kernen (radionucliden) opgenomen in stenen en sediment. De radionuclide concentraties zijn daarom een maat voor de bodemsamenstelling. De  $\gamma$ -straling wordt uitgezonden wanneer instabiele, natuurlijke kernen ( $^{40}\text{K}$  en vervalreeksen van  $^{232}\text{Th}$  en  $^{238}\text{U}$ ) vervallen. De energie van de uitgezonden straling is karakteristiek voor de vervallende kern. Door de energie van de  $\gamma$ -straling te meten en het aantal  $\gamma$ 's van een bepaalde energie te tellen wordt een radioactiviteitsprofiel van de bodem gemaakt en deze gegevens worden vertaald naar een bodemsamenstelling. Om deze vertaling te kunnen maken zijn precieze en kwantitatieve metingen nodig.

Als metingen enkel *precies* zijn (en niet kwantitatief), dan geven verschillen in radionuclide concentraties weliswaar aan op welke plaatsen de bodemsamenstelling verandert (dat wil zeggen: ze zijn indicatief), maar zulke metingen geven niet de samenstelling zelf. Zonder kwantitatieve concentraties kan namelijk de vertaling naar bodemsamenstelling niet gemaakt worden.

Als er alleen *kwantitatief* gemeten wordt (zonder precies te zijn) kan weliswaar de vertaling naar bodemsamenstelling gemaakt worden, maar is de betrouwbaarheid van de metingen gering, zie figuur.

Voor b  
van pr  
gemete  
systeem  
van een  
kilome  
plaatsre  
(tientall  
per mee

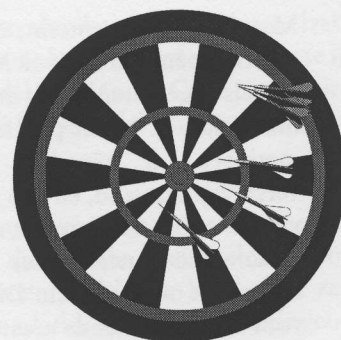
Het ver  
moeilijk  
anders is  
diamete  
is met st  
*in situ* n  
houden  
en toch  
meten.

Dit proe  
natuurlij  
hoofdstu  
tijd met r  
In het  
computer  
detector

### Precisi

De radion  
een bewe  
efficiënte  
het MEDU  
samenstell  
bijvoorbee  
buis welke  
wordt. Te  
hardware-  
in het alge  
het mogel  
meten.

Voor boorgatmetingen is het verkrijgen van *precieze* data moeilijk omdat er gemeten wordt met een bewegend systeem. De diepte van boorgaten varieert van een paar meter tot soms wel enkele kilometers, terwijl de gewenste plaatsresolutie vaak in de orde van enkele (tientallen) centimeters ligt. De meettijd per meetpunt is dus beperkt.



Het verkrijgen van *kwantitatieve* data is moeilijk omdat bijna elk boorgat weer anders is, bijvoorbeeld omdat de boorgat diameter anders is, of al dan niet versterkt is met stalen wanden. De uitdaging voor *in situ* metingen is dus om rekening te houden met deze verschillende condities en toch zowel *precies* als *kwantitatief* te meten.

*De darter met de donkere pijltjes gooit reproduceerbaar ("precies"), want alle pijlen zijn dicht bij elkaar. Toch zijn de worpen niet erg succesvol, want ver vanaf de roos. De darter met de lichte pijltjes gooit gemiddeld weliswaar dichterbij de roos ("kwantitatief"), maar de worpen zijn niet erg precies.*

Dit proefschrift gaat in op deze beide aspecten van boorgatmetingen van natuurlijke  $\gamma$ -straling. In het eerste deel van dit proefschrift (tot en met hoofdstuk 3) wordt het meetsysteem MEDUSA gepresenteerd, waarmee in korte tijd met relatief grote precisie de radionuclide concentraties gemeten kan worden. In het tweede deel van dit proefschrift wordt door middel van computerberekeningen kwantitatief de invloed van meetomstandigheden op de detectorrespons onderzocht.

### Precisiewerk

De radionuclide concentraties in de bodem zijn vaak laag en worden gemeten met een bewegende meetsonde. Er is dus een efficiënte stralingsdetector en een efficiënte data-analyse nodig. Hiertoe is op het Kernfysisch Versneller Instituut het MEDUSA systeem ontworpen. Dit systeem is oorspronkelijk gebouwd om de samenstelling van de zeebodem te karteren, maar het systeem is ook geschikt voor bijvoorbeeld boorgatmetingen. De stralingsdetector is geplaatst in een aluminium buis welke met behulp van een lange kabel en een lier door het boorgat bewogen wordt. Ten opzichte van andere bestaande systemen is MEDUSA zowel aan de hardware- als aan de software-kant verder geoptimaliseerd voor *in-situ* metingen in het algemeen. Hierbij is een factor 15 in gevoeligheid gewonnen. Hierdoor is het mogelijk om zelfs kleine verschillen in radionuclide concentraties nog te meten.

Maar zoals al opgemerkt, alleen precieze metingen zijn niet voldoende. Voor elk meetsysteem (en dus ook MEDUSA) geldt dat de meetresultaten niet kwantitatief zijn als er gemeten wordt in een configuratie waarvoor de respons van het systeem niet geijkt is. In dit proefschrift geef ik een voorbeeld van twee verschillende metingen in hetzelfde boorgat, één keer gemeten *met* een stalen verstevigingswand, en één keer *zonder* (figuur 1.4). Het blijkt dat als de invloed van de stalen wanden niet meegenomen wordt in de data-analyse, de berekende radionuclideconcentraties in hetzelfde gat met wel 50% verschillen. Dit is natuurlijk onrealistisch. Dit betekent dat het meetsysteem geijkt moet worden voor de verschillende meetsituaties.

## Modelwerk

In de standaard manier van ijken wordt de respons van het meetsysteem bepaald in een goed omschreven experiment, met bekende radionuclide concentraties. Omdat boorgatmetingen in zoveel verschillende configuraties worden uitgevoerd is het praktisch onmogelijk om voor elke configuratie een ijkopstelling te bouwen. Zelfs één enkel boorgat kan al uit verschillende trajecten bestaan met verschillende diameters, wanddiktes, enzovoort.

Een alternatieve manier om de detectorrespons te bepalen is door middel van (computer-)berekeningen. In een computermodel worden een groot aantal  $\gamma$ 's "gegenereerd" en gevolgd van hun plaats in de bodem tot ze al hun energie hebben verloren. Op die manier is het mogelijk om een soort gemiddeld gedrag van de straling te simuleren, en de respons van een detectorsysteem te bepalen. Dit soort berekeningen wordt "Monte Carlo simulaties" genoemd. De hoeveelheid gesimuleerde  $\gamma$ -straling bepaalt de precisie van de berekening.

Computersimulaties zijn niet begrensd door praktische beperkingen zoals de zuiverheid van radioactieve bronnen, dichtheid en samenstelling van gebruikte materialen enzovoort. Een bijkomend voordeel van computerberekeningen is dat de gebruiker volledige controle heeft over alle aspecten van de gemodelleerde configuratie. Zo is het bijvoorbeeld ook mogelijk om de herkomst in de formatie van gedetecteerde straling te bepalen. Op die manier geven de simulaties niet alleen de detectorrespons, maar ook inzicht dat niet verkregen kan worden met experimenten. In dit onderzoek heb ik het computerprogramma MCNP (versie 4C) gebruikt.

Ik heb modellen opgesteld om boorgatmetingen van natuurlijke  $\gamma$ -stralers te simuleren. De resultaten, gepresenteerd in hoofdstuk 6, zijn vervolgens vergeleken met metingen in een laboratorium. Uit deze vergelijking blijkt dat de computermodellen zeer goed de complexe vervalreeksen van thorium en uranium beschrijven. Bovendien kon op grond van de Monte Carlo simulaties worden aangetoond dat de laboratoriumexperimenten geen goede representatie zijn van

een we  
zien da  
voor el  
(2) dat  
ontwer

Dit so  
rekenkr  
grootsc  
beschik  
zelfs vo  
bron ger  
zijn rek  
rekentij  
moet we  
wordt b  
bepaald,  
rekentij

In dit p  
("variant  
reden vo  
straling  
rekenkur  
berekenin  
de detect  
de uitkon

Een nieu  
interactie  
elektrone  
Tradition  
detector g  
Hierdoor  
gepresent  
detector n  
ruimte wo  
statistisch  
te combine  
om de ben  
is de 16 jaa  
van de sim  
Carlo simu



een werkelijk veldmeting. Deze vergelijking van simulatie en experiment laat dus zien dat (1) het mogelijk is om de detectorrespons kwantitatief en precies te ijken voor elke willekeurige configuratie door middel van Monte Carlo simulaties en (2) dat Monte Carlo simulaties een belangrijk hulpmiddel (moeten) zijn bij het ontwerp van experiment en meetsysteem.

Dit soort Monte Carlo simulaties heeft enorm geprofiteerd van de groei in rekenkracht van computers. Configuraties die enkele jaren geleden nog te grootschalig waren om door te rekenen, komen nu binnen het bereik van de beschikbare rekenkracht. Echter, precieze simulaties van boorgatmetingen zijn zelfs voor moderne computers nog te tijdrovend. Omdat een "oneindig" grote bron gemodelleerd moet worden, met meer dan 800 verschillende bron-energieën zijn rekentijden van enkele dagen of weken geen uitzondering. Dit soort rekentijden is onpraktisch wanneer enkele honderden configuraties doorgerekend moet worden en dus zijn rekenkundige optimalisaties nodig. In hoofdstuk 7 wordt bijvoorbeeld de invloed van de positie van de meetsonde in een boorgat bepaald, figuur 7.11. Zonder optimalisaties zou voor deze simulaties 16 jaar rekentijd nodig zijn op een Pentium 4, 1.7GHz.

In dit proefschrift worden daarom bestaande rekenkundige optimalisaties ("variantie reductie technieken") gebruikt en nieuwe ontworpen en getest. Een reden voor de lange rekentijd is het feit dat het merendeel van de uitgezonden straling niet de detector bereikt. Dit is een welbekend probleem waarvoor rekenkundige optimalisaties zijn ontwikkeld, door voornamelijk  $\gamma$ -straling in de berekening op te nemen waarvan vooraf vast staat dat zij een reële kans heeft om de detector te bereiken. Deze optimalisaties tasten de kwantitatieve juistheid van de uitkomst niet aan.

Een nieuwe optimalisatie is in dit proefschrift ontwikkeld en getest. In de interactie van  $\gamma$ -straling met materie worden veel elektronen geproduceerd. Deze elektronen hebben op hun beurt heel veel interacties, maar komen niet erg ver. Traditioneel worden ook de trajecten van elektronen op grote afstand van de detector gevolgd, zonder dat zij een reële kans hebben om de detector te bereiken. Hierdoor gaat zeer veel rekentijd verloren. In dit proefschrift is een methode gepresenteerd die de ruimte in twee delen verdeelt: één waar de elektronen de detector nog kunnen bereiken en één die de rest bestrijkt. In de laatstgenoemde ruimte wordt alleen  $\gamma$ -straling getransporteerd. Op deze manier wordt dezelfde statistische precisie bijna twintig keer sneller bereikt. Door deze nieuwe methode te combineren met enkele bestaande rekenkundige optimalisaties was het mogelijk om de benodigde rekentijden in totaal met een factor 80 te verminderen. Hiermee is de 16 jaar rekentijd van figuur 7.11 gereduceerd tot 84 dagen terwijl de precisie van de simulaties gelijk is gebleven. Door deze optimalisaties worden de Monte Carlo simulaties voor het eerst een praktisch haalbare oplossing om meetsystemen

van natuurlijke  $\gamma$ -straling, zoals MEDUSA, in relatief korte tijd geschikt te maken voor kwantitatieve metingen in elke willekeurige configuratie.

### Maatwerk

De in dit werk ontwikkelde Monte Carlo modellen zijn toepasbaar op elk type MEDUSA meting (zoals zeebodemkartering of veldmetingen). In dit proefschrift zijn ze echter ontwikkeld en gebruikt om de invloed van verschillende boorgatconfiguraties op de respons van een MEDUSA detector door te rekenen. Hierbij is de afscherpende werking van stalen boorgatwanden en formatiedichtheid onderzocht, onder de invloed van de boorgatdiameter. Op deze manier is voor meer dan 100 configuraties de respons van MEDUSA bepaald en is de invloed van elke parameter gekwantificeerd, zie hoofdstuk 7. De resultaten van de simulaties zijn gebruikt om de al eerder genoemde metingen in één boorgat in twee verschillende meetconfiguraties opnieuw te analyseren. Hieruit blijkt dat de gesimuleerde detector ijkingen goed de experimentele meetomstandigheden verdisconteren, en dat dankzij de gesimuleerde ijkingen, de gemeten radionuclide concentraties onafhankelijk zijn van de meetconfiguratie. Dat deze correcties voor meetconfiguratie toegevoegde waarde hebben blijkt uit het feit dat deze correcties onderdeel zullen gaan uitmaken van de analyse-software van ANTARES, een fabrikant van hoogwaardige boorgat-meetapparatuur.

Dankzij de verbeteringen in de meetapparatuur kan nu preciezer dan ooit *in situ* natuurlijke  $\gamma$ -straling van sedimenten gemeten worden. Door de ontwikkelde rekenmodellen is de inzetbaarheid van zulke meetapparatuur vergroot. Voor het eerst is het mogelijk om, ongeacht de meetomstandigheid, *precies* en *kwantitatief* de radionuclide concentraties in de bodem te meten. Dankzij deze ontwikkelingen kan de bodem voortaan beter doorgrond worden.